

時空間相関を考慮した地先の水害リスクの評価方法に関する研究：大規模河川流域を対象として

京都大学・防災研究所 教授 多々納裕一
京都大学・防災研究所 特任助教 蔣 新宇

概要：

本研究では、複数の河川からの浸水や内水氾濫等、複数の洪水ハザードとその相関性を考慮した流域内各地先の水害リスクを計量化するための方法論を開発する。本稿では、時空間的に多様性を有し、かつ、擬似的に長期間の観測データとみなしうる「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)を用いた地先の水害リスク評価の方法論を提案し、庄内川流域を対象として提案した方法論の適応可能性を実証した。具体的には、①d4PDF から得られる降水量の時空間分布パターンに対して(超過)確率を付与して多数の「降雨シナリオ」を設定する、②統合型水害シミュレーションモデルによって、降雨シナリオを水害シナリオに変換する、③水害シナリオに基づいて地先ごとに被害の超過確率分布を作成する、という方法を用いた。実証分析の結果、実用に足る精度で、比較的効率的に各地先の水害リスクが算定されることが示された。

キーワード：地先の水害リスク、複数の洪水ハザード、d4PDF、2次確率

1. 研究の目的と概要

総合治水の導入以来、治水施設整備などの構造的な手段のみならず、土地利用の規制誘導等の非構造的な手段を効果的に組み合わせ、流域の治水安全度を高めていくことが要請されてきている。総合的な治水対策の有効性を検証するためには、流域内の各地先の水害リスク（被害の確率分布）を適切に把握し、各種施策の効果を計量化していくことが望まれている。また、気候変動への適応策としての治水対策を検討するに際しても、地先の水害リスク評価をまずもって進めていくべきであるという方針が、河川整備審議会水関連分野の気候変動適応策検討小委員会に置いて確認されている。

小規模河川流域を対象とすれば、異なる洪水到達時間等に着目して、複数の洪水ハザードの生起を規定する降水量の同時生起確率を求め、(流域平均)降雨の時間分布に対して超過確率を付与することができる。瀧らは降雨強度式を用いて確率規模別に中央集中型のハイトグラフを作成し、統合型水害シミュレーションを介して地先の水害リスクを計量化する方法を示している^[1]。Jiang and Tatano は、降雨強度式を用いる方法をその特殊形として含むコピュラを用いる方法を提案し、水害リスクカーブを作成する方法も合わせて示している^[2]。しかしながら、これらの方法は降雨の空間的な均質性を仮定した方法であり、流域面積が大きく、空間的な均質性を仮定できない大規模河川流域には適用が困難であった。

大規模河川流域に対して、同様の方法を適用しようとすれば、超過確率に対応した降雨の時空間分布パターンをいかにして生成するかが問題となる。この際には、降雨の空間相関構造等を含む高度な解析方法の開発が必要となる。

一方、実務的には大規模河川流域においては実績降雨を引き延ばすことによってこのような問題を回避した形で、河川整備に用いる計画降雨が設計されている。この場合は実績降雨に統計処理を施すことで、超過確率を付与し、被害の確率評価を可能としている。

本研究では、最近利用可能となってきた「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)に収録された降水量の時空間分布パターンに統計解析を施し、これらの降水量の時空間分布パターンに超過確率を付与することでこの問題の克服を目指すこととした。以下では、このような考え方に立脚した地先の水害リスク評価の方法論を提示するとともに、庄内川流域を対象として実施した実証分析の結果を示すこととする。

2. 大規模流域における地先の水害リスク評価の方法論の開発

Jiang and Tatano は、中小河川流域を対象として地先の水害リスクを評価するための方法論を提示した(図1)。具体的には、①まず、それぞれの洪水ハザードに対して

洪水ピーク流量を規定する降雨継続時間内の総降雨量の同時分布を求め、この分布に基づいた超過確率を持つ降雨波形である降雨シナリオを多数生成する（コンピュータを用いた降雨シナリオの生成）、②降雨シナリオを統合型洪水シミュレーションを介して、被害の空間分布とその超過確率により構成される水害シナリオに変換する（統合型シミュレーションモデルによる水害シナリオへの変換）、③水害シナリオを各地先ごとに整理して、各地先ごと水害による被害の超過確率分布であるリスクカーブを算定する（水害シナリオに基づく地先の水害リスクの評価）、というプロセスを経て、各地先ごとに水害リスクが算定されるというものであった。この際、降雨シナリオの生成に際して、流域面積が比較的小さい流域を対象とすることから、降雨シナリオは流域内の各地点で同一であるという仮定が置かれている。しかしながら、大規模河川流域では、流域面積も大きく降雨の空間的な均質性を仮定することは非現実的である。また、流域内の各地点で同様の降雨パターンが出現するという仮定は、現実性に乏しいのみならず、被害の生起確率である水害リスクの推計にバイアスをもたらす危険性がある。

いま、仮に、長期間にわたる観測データが蓄積されているとしよう。この場合には、そのデータから、降水量の時空間分布パターンを収集し、統計解析を施して、各パターンに確率を付与することが可能となり、空間的な均質性を仮定しない形で、降水量の時空間分布パターンとその超過確率を得ることができる。

文科省・気候変動リスク情報創生プログラムでは、高解像度全球大気モデルおよび高解像度領域大気モデルを用い、これまでにない多数（最大 100 メンバ）のアンサンブル実験を行うことによって、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について、十分な議論ができる「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」を作成している。このデータベースには、現在気候下で、1951年～2010年の60年間を対象として、60kmAGCMで100メンバ、20kmダウンスケールモデルで50メンバのデータが蓄積されている。20kmダウンスケールモデルの結果だけでも、現在気候下の条件で60*50=3000年分の観測記録が得られたことに相当する。

大規模流域における地先の水害リスク評価の方法論の構築に際して、本研究では、d4PDFに蓄積された20kmダウンスケールモデルによる3000年分の降水量データを用いることとした。擬似的に時空間的に不均質な実績降雨パターンとしてみなすことができると仮定し、d4PDFから、降雨の時空間分布パターンを多数抽出し、統計解析を施せば、各パターンに超過確率を付与することができる。

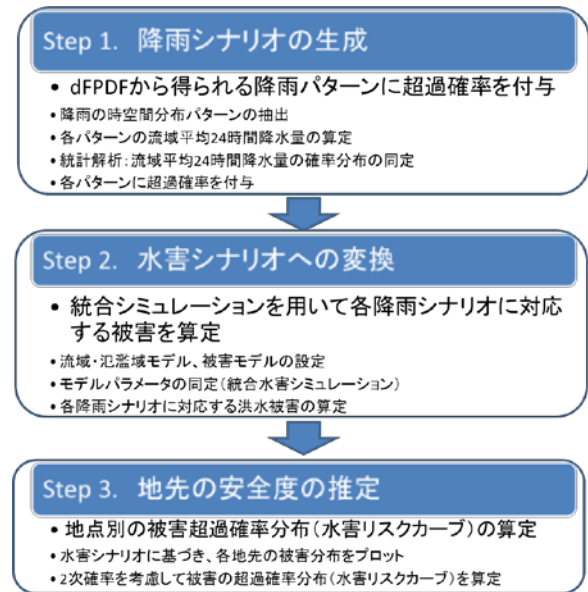


図1 大規模流域における地先の水害リスク評価のための方法論

本研究で提案する方法論を図1に示す。Step1では、d4PDFから得られる降雨パターンに確率情報を付与するために極地統計解析を実施する。その結果、降雨の時空間分布パターンとその超過確率とを属性として持つ降雨シナリオが生成される。Step2では、統合水害シミュレーションを用いて降雨シナリオを被害とその超過確率で与えられる水害シナリオに変換する。この段階で、被害の空間分布とその確率が与えられる。Step3では、被害の空間分布とその確率に基づき、各地先の被害の確率分布が推計され、水害リスクカーブが生成される。降雨シナリオの生成に際して付与した超過確率は、被害の超過確率を正確には表しえない。必ず、被害の確率分布には不確実性が残留する。本研究では、「この残留する不確実性を2次確率を用いて、被害の確率評価に取り込み超過確率分布を求める方法も提案する。

3. 実証分析

3.1 対象地域

本研究では庄内川流域を対象として実証分析を実施する。庄内川は、岐阜県南東部および愛知県北西部を流れ伊勢湾に注ぐ河川であり、一級水系庄内川の本流である。流路延長96 km、流域面積1,010 km²である。庄内川流域現在では、17市7町におよそ430万人(平成18年3月)が居住しており、特に、下流域には名古屋市が位置し、市街化が進展している。庄内川流域では、昔から洪水により浸水被害を被ってきた。1779年から現在までに、19回もの水害に見舞われてきた。

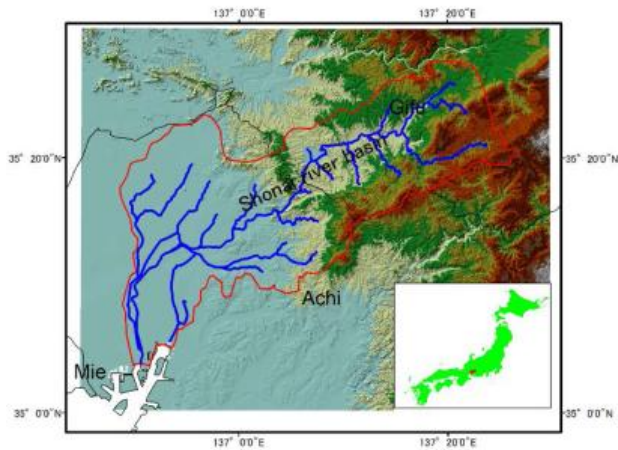


図2 庄内川流域の位置および地形

3.2 水文統計解析: d4PDF に基づく降雨シナリオの生成

(1) 降雨の時空間分布パターンの抽出

図3に庄内川流域周辺のd4PDFの20kmダウンスケールモデルのメッシュを示す。時間雨量をd4PDFから抽出した。その上で、すべてのメッシュ内での無降雨時間が6時間を超えない降雨は一連の降雨としてみなし、降雨の時空間分布を作成した。その結果、約3000のパターンを得た。

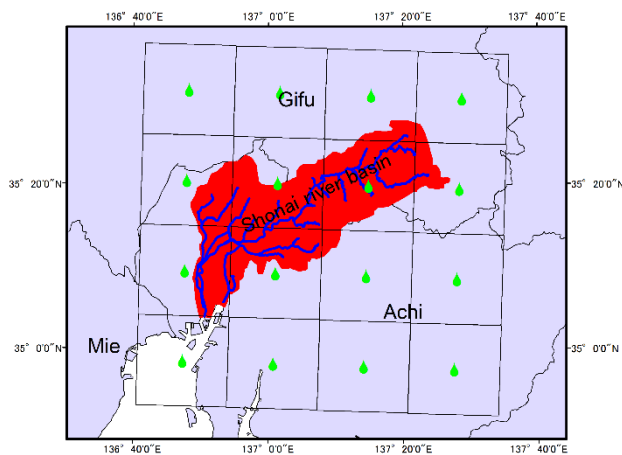


図3 対象流域付近のd4PDFの20kmダウンスケールモデルのメッシュの位置

(2) 流域平均24時間雨量の算定と統計解析

それぞれの降雨の時空間分布パターンに対して、流域平均24時間雨量を算定した。それをもとに、年最大値を求め、極値統計解析を実施し、図4を得た。

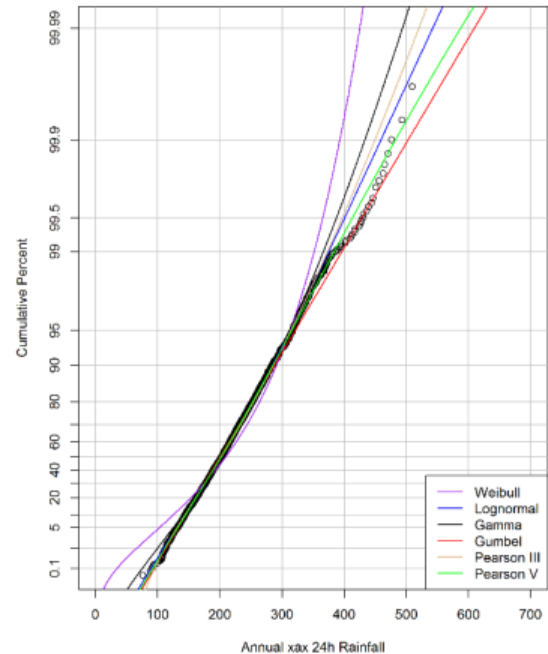


図4 極値分布のあてはめ

あてはめの対象とした分布は、ワイブル、ガンベル、ガンマ、対数正規、ピアソンIIIおよびV型分布である。分析の結果、最も適合度の高かったピアソンV型（パラメータ：20.195, -35.105, 4704.497）を採用することとした。

(3) 降雨シナリオの生成

(1)で抽出した降雨の時空間分布パターンのそれぞれに対応する24時間流域平均雨量をもとに、上記の確率分布に対応する年超過確率を算定し、降雨の時空間分布パターンと年超過確率とを属性として有する降雨シナリオを作成した。

3.3 統合水害シミュレーションを用いた水害シナリオへの変換

(1) モデルの設定

まず、図5に示すように、流域を地形と土地利用によって、流出エリアと洪水リスク評価エリアの二つ部分に分ける。ここで、洪水リスク評価エリアは人口や資産の集中する下流部分の氾濫原であり、流出エリアは流域の上流部分である。洪水リスク評価エリアは50 m × 50 mメッシュに分割している。流出エリアは地形によって、複数の集水区に分割した。流出計算はkinematic wave法で、氾濫解析は浅水方程式で解析した^[3]。

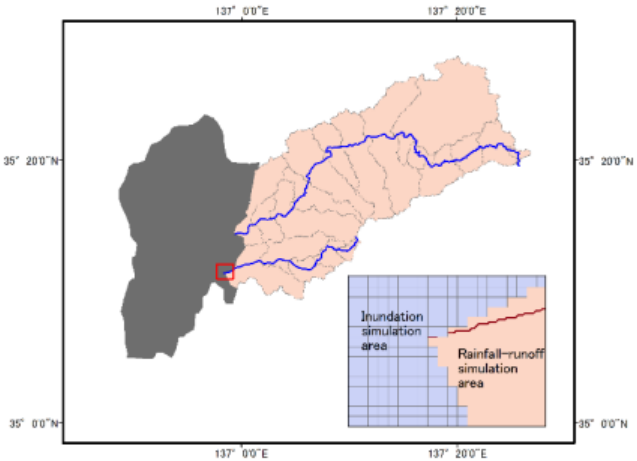


図5 流出エリアと洪水リスク評価エリア
被害モデルに関しては、まず、人口・資産分布（暴露）を算定した。図6にその結果を示す。各資産の脆弱性に関しては、治水経済調査要綱に従って設定している。

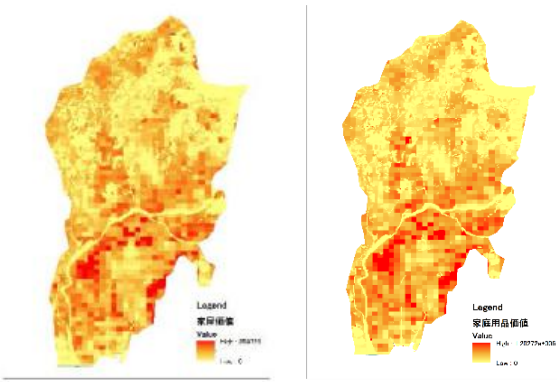


図6 家屋資産（左）、家庭用品資産(右)の空間分布

(2)統合水害シミュレーションモデルパラメータの同定
平成の実績降雨を用いて、流出モデルのパラメータの同定を行った。図7に示す志段味、多治見、土岐の各流量観測データとの比較を実施した。

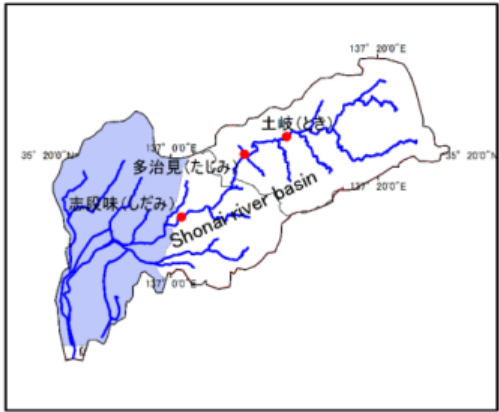


図7 検証に用いる流量観測所の位置

図8に結果を示す。いずれの地点においても比較的良好な適合性を示していることが読み取れる。

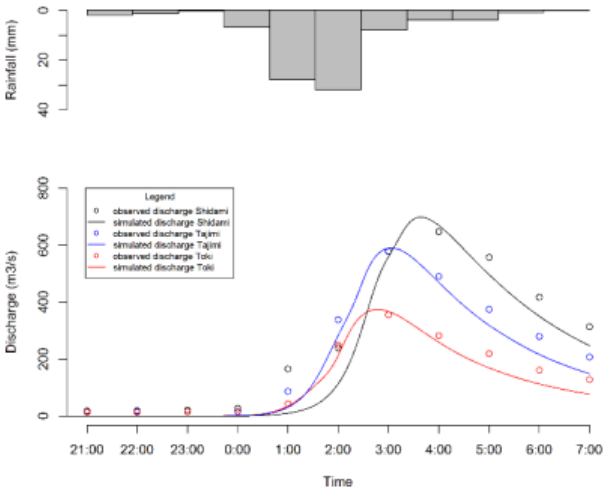


図8 キャリブレーションの結果
(○：実績、線：再現結果、赤：土岐、青：多治見、黒：志段味)

(3)各降雨シナリオに対応する洪水被害の算定
約3000の降雨シナリオの中から24時間流域平均雨量の大きな300のシナリオを用いて統合水害シミュレーションを実施した。その結果の一部を以下に示す。
まず、これらの結果と現行計画との関係をみるために、表-1に示すように流域平均24時間降雨量最大ケース(530mm)、1/200相当ケース(413mm)、1/100相当ケース(383mm)に対する流出計算結果と現行計画値とを比較する。この結果、若干d4PDFを用いた本研究の設定値の方が計画値を上回るものの、概ね妥当な水準の計算ができていることが確認できた。

表-1 各地点の流出量再現結果と計画値との比較

		枇杷島	志段味	多治見	土岐
計画降雨	1/200	4200m³/s			
	1/100			2400m³/s	
d4PDF	1/200		4305m³/s	2607m³/s	1608m³/s
	1/100		3976m³/s	2430m³/s	1530m³/s
	Max		4413m³/s	2680m³/s	1700m³/s

1/200相当のケースに対応する計算結果の一部を図9および図10に示す。図9は氾濫解析の結果であり、図10は対応する被害の空間分布である。

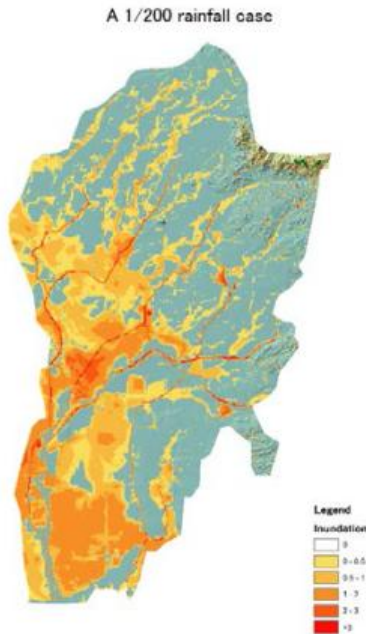


図 9 1/200 相当の降雨パターンに対応した最大浸水深分布

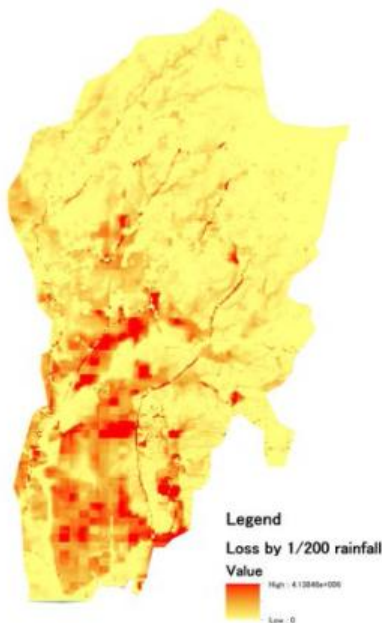


図 10 1/200 相当の降雨パターンに対応した最大浸水深分布

3.4 地先の水害リスク評価

統合水害シミュレーションの結果、被害額の空間分布とその超過確率を属性として有する水害シナリオが 300 求まった。洪水リスク評価エリア内の任意のメッシュにおいて、図 11 に示すような散布図が描ける。この散布図は横軸に被害額（メッシュ内の被害額の合計）を縦軸にその超過確率をとり、各シナリオに対応した値がプロットされている。各メッシュおよび評価エリア内の水害リスクの分布を示している。

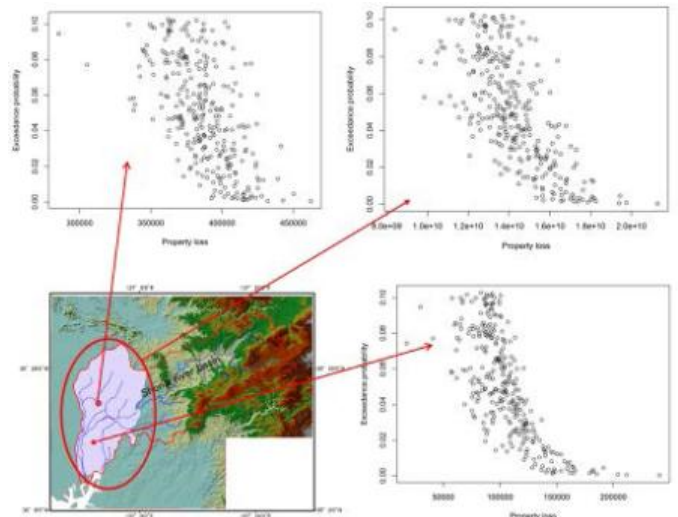


図 11 各メッシュごとに算定した水害リスクの分布
(ただし右上の散布図は評価エリア内の水害リスクを示す)

これらの図から明らかなように、24 時間流域平均降雨という 1 つの指標で確率評価したために、必ずしも与えられた超過確率が被害の超過確率とは一致せず、不確実性が残っていることがわかる。このような不確実性をもリスク評価に取り込むために以下のように 2 次確率を用いて超過確率を評価することとした^[4]。

流域平均 24 時間雨量のレンジを所与とした場合にも空間分布の違い等によって被害にはばらつきが生じる。流域平均 24 時間雨量を最大加算無限個の区間

$R_k = [r_k, r_{k+1})$ に分割しよう。この時、区間 R_k 内に流域平均 24 時間雨量 r が入っている確率は

$$\Delta P_k = P(r_{k+1}) - P(r_k)$$

として与えられる。区間 R_k に流域平均 24 時間雨量 r が入っているという条件のもとで、被害 $L(r)$ が L を下回る確率を以下のように定義する。

$$F_k(L | R_k) = \Pr\{L(r) | r \in R_k\}$$

この時、 $F_k(L | R_k)$ は、同じ流域平均 24 時間降雨が同じ区間に属する降雨シナリオに対応する被害の確率分布（分布関数）である。

$F_k(L | R_k)$ に関しては分布関数として適合度の高い関数を用いればよいが、本研究では適合度検定の結果として対数正規分布を採用し、図 12 のように各区間ごとに $F_k(L | R_k)$ のパラメータを算定した。

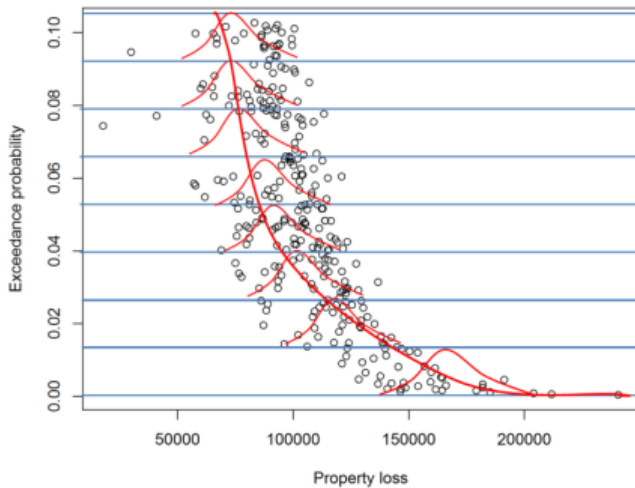


図 12 区間分割と条件付き分布の推定

いま、我々が求めたいのは条件付きでない被害の超過分布 $\Pr\{L(r) \geq L\}$ であるから、全確率の定理を利用して

$$\Pr\{L(r) \geq L\} = 1 - \sum_k F_k(L | R_k) \Delta P_k$$

を算定すれば被害の超過確率分布を求めることができる。図 13 に評価エリア内で集計された被害額の超過確率分布（水害リスクカーブ）を示す。

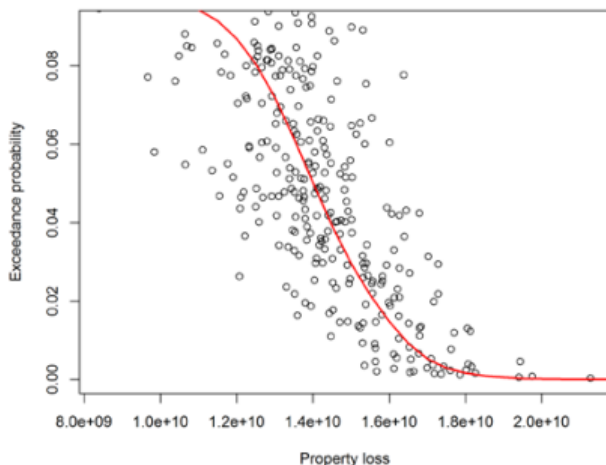


図 13 水害リスクカーブ（評価エリア内の被害総額の超過確率分布）

4. 考察

本研究で得られた成果を取りまとめると以下のようである。

① d4PDFを用いた地先の水害リスク評価の方法論の提案

② 庄内川流域での実証分析を通じた適用可能性の検証

空間的に不均一な多数の降雨分布が d4PDF によって与えられることに着目し、統計解析により超過確率を付与して降雨シナリオを生成できる可能性を示した。降雨シナリオを被害シナリオに変換する際には統合水害シミュレーションを利用すればよい。これらの情報をもとに地先の洪水リスク（リスクカーブ）を作成するためには、不確定性をリスク評価に織り込むための方法の開発が必要であったが、2 次確率を用いて、不確定性をも考慮したリスクカーブの作成方法を提示することができた。

今後の課題としては、確率の付与に際して流域平均 24 時間雨量を用いたが、中小河川流域の検討の際に議論したように多次元の指標を用いた場合との比較が少なくとも必要であろう。d4PDF は気候変動適応策の検討をするために必要な将来気候条件のアンサンブル計算の結果も数多く収録されているため、気候変動が各地先の水害リスクに影響する様子を把握し、有効な適応策を見出すための研究を進めることは今後早急に実施すべき内容だろうと考えている。今回は特に氾濫原のモデル化に際してデジタル地形データ（50m*50m）を用いたが、より精緻な分析のためには、正確な堤防や河川の将来なモデル化等も必要となる。これらの点に関しては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Taki, K., T. Matsuda, and E. Ukai (2013), Method for evaluating flood disaster reduction measures in alluvial plains, J. Flood Risk Management, 6(3), 210-218.
- 2) Jiang, X. and Tatano, H.: A rainfall design method for spatial flood risk assessment: considering multiple flood sources, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 12, 8005-8033, doi:10.5194/hessd-12-8005-2015, 2015.
- 3) Liang Q, Borthwick A G L. Adaptive quadtree simulation of shallow flows with wet-dry fronts over complex topography[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(2): 221-234.
- 4) 多々納裕一・高木朗義（編著）：防災の経済分析, 勁草書房, 2005.